

# Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-42-45>

## КОЗЛОВА О.Ю.

Канд. техн. наук, доцент кафедры  
высшей математики  
и программирования РТУ МИРЭА,  
119454, г. Москва, Россия,  
e-mail: kozmaster@mail.ru

*Использование имитационного моделирования горных работ позволяет свести к минимуму риск принятия неправильных решений в области проектирования и развития предприятий горнодобывающей отрасли.*

**Ключевые слова:** языки программирования, разработка рудника, имитационное моделирование, диспетчеризация, процессор, графический фрагмент.

**Для цитирования:** Козлова О.Ю. Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле // Уголь. 2022. № 5. С. 42-45. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-42-45.

## ВВЕДЕНИЕ

Сложившиеся макроэкономические условия функционирования горнодобывающих предприятий с колоссальным диапазоном изменения горно-геологических и горнотехнических условий залегания пластов и рудных тел, огромной капиталоемкостью и материалоемкостью добычи полезных ископаемых на базе альтернативных вариантов организационных, технологических и технических решений определяют выбор и обоснование оптимальных проектных решений с использованием программных продуктов горного назначения. Только на базе использования моделирования горных работ можно свести к минимуму риск принятия неправильных решений в области проектирования и развития предприятий горнодобывающей отрасли.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

При функционировании горнодобывающего предприятия необходимо соблюдать баланс между увеличением интенсивности извлечения полезного ископаемого из недр и сохранением безопасности ведения горных работ [1]. Отработка месторождения нарушает породный массив, что приводит к изменению его напряженно-деформированного состояния [2]. Все это повышает вероятность возникновения техногенных явлений. Горные работы и техногенные явления приводят к возникновению вибрационных колебаний, распространяющихся на большие расстояния и оказывающих влияние на подземные горные выработки, а также на здания и сооружения, расположенные на поверхности [3]. Одним из способов управления напряженно-деформированным состоянием породного массива и повышением безопасности является применение закладки [4, 5, 6]. С целью повышения безопасного ведения горных работ с одновременной интенсификацией извлечения полезного ископаемого необходимо создать инструмент, позволяющий обеспечить принятие правильного решения. Одним из таких механизмов является имитационная модель. Моделирование в горном деле применяется уже не первое десятилетие. Оно обеспечивает прогнозирование процессов, происходящих в подработанном массиве [7], имитацию отдельных производственных процессов [8] и полное представление работы горного оборудования и его отдельных механизмов [9, 10, 11].

Известная технология GPGPU (General Purpose computing for Graphical Processing Units) является мощным инструментом для переноса задач параллельной обработки информации на GPU (Graphical Processing Unit – графический процессор). Эта технология находит применение практически в любой области, требующей проведения массы параллельных расчетов, и применяется как в научной и коммерческой, так и в любительской среде. Однако она отличается падением производительности ввиду предикации ветвления кода [12].

При решении задач, связанных с оперативным планированием работы горнодобывающего предприятия широкое распространение получило имитационное моделирование (ИМ), использование которого обеспечивает оперативное принятие решения задач по проектированию и развитию предприятий горнодобывающей отрасли.

## Сравнение пакетов имитационного моделирования

Система	Производитель	Приложения	Графическая конструкция ИМ	Программирование моделей
EXTEND	Imagine That, Inc. Сан-Хосе, штат Калифорния	Стратегическое планирование, бизнес-моделирование	Компоновочные блоки, дискретное и непрерывное моделирование	+ Язык программирования ModI
ITHINK	High Performance System, Inc Ганновер, штат Нью-Хэмпшир	Управление финансовыми потоками, реинжиниринг предприятий	CASE-средства, потоковые диаграммы	-
VENSIM	Ventana Systems	Модели системной динамики	Потоковые диаграммы	-
POWERSIM	Powersim Co Берген, Норвегия	Непрерывное моделирование	Потоковые диаграммы	+
PILGRIM	МЭСИ, Россия	Модели динамических систем	CASE-средства, компоновочные блоки	+ Язык программирования C++
PROCESS CHARTER	Scitor Менло-Парк, штат Калифорния	Дискретное моделирование	Блок-схемы	-
ANYLOGIC	Санкт-Петербург, Россия	Системная динамика, Дискретно-событийное моделирование, Агентное моделирование	Платформа Eclipse Каталог шаблонов	+ Язык программирования Java
DELMIA	Dassault Systemes, Франция	ППР-модели данных	Интерактивные производственные приложения для электронно-цифрового предприятия	+
TECHNOMATICS PLANT SIMULATION	-	Объектно-ориентированное программирование	Потоковые диаграммы	+ Язык программирования SimTalk
ARENA	Rockwell Automation	Дискретное моделирование	Потоковые диаграммы	+ SIMAN
AGNES (AGENT NETWORK SIMULATOR)	Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия	Дискретное моделирование	Кросс-платформа	+ Язык программирования Java
AWESIM	Symix Systems Inc., США	Дискретное и непрерывное моделирование	Сетевые модели	+ C/C++ или Visual Basic
FLEXSIM	FlexSim Software Products Inc. (FSP), Orem, Юта, США	Дискретное и непрерывное моделирование	Симуляционные и графические библиотеки	+ C++
GPSS WORLD	Minuteman Software Corp., США	Дискретное и непрерывное моделирование	GP55-программы	+ Plus
MTSS (MANUFACTURING AND TRANSPORTATION SIMULATION SYSTEM)	Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, Россия	Дискретное и непрерывное моделирование	Предметные библиотеки элементарных программ	+ Язык программирования Java
MVSTUDIUM	Санкт-Петербург, Россия	Дискретное, непрерывное и гибридное моделирование	Модели с математическим уровнем абстракции	+ Язык программирования Java
SIMSCRIPT III	CACI Advanced Simulation Lab, Сан-Диего, Канада	Дискретное и непрерывное моделирование	Специализированные библиотеки, базы данных и пакеты, подобные HLA RTI (High Level Architecture Run-Time Infrastructure)	+ Язык программирования Java, C/C++
RDO-STUDIO	МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия	Объектно-ориентированное моделирование	Интеллектуальная интегрированная среда имитационного моделирования	- РДО

ли, сведение к минимуму рисков принятия неправильных решений в данной области [13, 14, 15, 16].

Современное развитие компьютерных и цифровых технологий в горном деле позволяет на базе имитационного моделирования решать задачи оптимизации основных параметров горнодобывающих предприятий и выбора стратегий развития на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективу, хотя практическая реализация их еще недостаточно совершенна.

Таким образом, основные приложения имитационного моделирования в горном деле направлены на решение задач оптимизации транспортных потоков. Программные продукты имеют в наличии функции, обеспечивающие возможность прослеживания динамики работы транспортной системы рудника в представленных необходимых временных трендах (месяц, неделя, сутки). Подобное ИМ разработано в программной среде Arena версии 12.0 (компания Rockwell Automation). Также имеется функция, предоставляющая возможность изменять количество транспортных машин в целях оптимизации технико-экономической эффективности горнодобывающего производства. В качестве входных данных для ИМ используются основные технические характеристики используемого транспорта. К ним относятся: дневной (месячный) объем добычи, грузоподъемность транспортных единиц, скорость перемещения груза, сменное количество рейсов, объем вскрыши, усредненное время выполнения производственных операций. Параметры экскаваторов представлены вместимостью ковша, средними темпами ведения горных работ, средним временем загрузки автосамосвала.

В качестве выходных данных представлены – минимальная, максимальная и средняя производительность автосамосвалов, число рейсов за смену, объем породы, перевозимый самосвалами за смену, время всех простоев, продолжительность выполнения каждой производственной операции. Результаты экспортировались и интерпретировались в Microsoft Excel.

Синтез динамических моделей взаимной работы очистного оборудования комплексно-механизированного забоя предполагает имитационные эксперименты на базе проблемно-ориентированного имитатора сетей Петри NETSTAR (модули сетей Петри). При этом обеспечивается дополнение критериев, учитывающих многовариантность анализа технико-организационных решений; возможность учета стохастичности выполнения производственных технологических операций; возможность моделирования взаимодействия компонентов очистного оборудования в пространстве и времени; возможность анализа и выявления «узких мест» в технологии угледобычи.

По данным официального сайта «Национального общества имитационного моделирования», сейчас в мире насчитывается около 500 программных продуктов. Обобщающая информация и сравнительная характеристика наиболее популярных современных систем имитационного моделирования представлены в *таблице*.

Для оценки возможностей использования прикладных аспектов пакетов имитационного моделирования необходимо учитывать следующие составляющие: простота

разработки и архитектурное исполнение модели, количество заранее сформированных программных компонентов, низкая трудоемкость ее реализации и присутствие необходимого набора форматов для вывода печатных и графических результатов с анимацией. Кроме того, нужно оценить возможность модификации и трансформации программного обеспечения со специальными системами управления к реальным задачам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные пакеты ИМ в автоматическом режиме предоставляют необходимое количество функциональных возможностей для создания модели, что, в конечном итоге, позволяет существенно сократить трудозатраты и время, необходимые для осуществления процесса программирования, и сократить общие эксплуатационные издержки.

2. Программные продукты ИМ обеспечивают оптимальную среду для создания моделей на базе основных адаптивных моделирующих конструкций, что обеспечивает возможность их модификации и трансформации.

3. Современные пакеты ИМ имеют в наличии более совершенные процедуры выявления и обнаружения системных ошибок, поскольку они автоматизированы. Таким образом, минимизируется риск принятия неправильных и неоптимальных решений.

## Список литературы

1. Повышение безопасности при извлечении водорастворимых руд путем оптимизации параметров закладочного массива / М.М. Хайрутдинов, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, А. Хайрутдинов и др. // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 1. С. 53-59.
2. Адигамов А.Э., Юденков А.В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 8. С. 93-103.
3. The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments / A. Herbut, M.M. Khairutdinov, C. Kongar-Syuryun et al. / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 362. 012131.
4. Mechanization of stowing mix transportation, increasing its efficiency and quality of the created mass / A. Adigamov, J. Rybak, K. Golovin et al. // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. P. 9-16.
5. Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 684. 012007.
6. Calculation of transportation of the stowing composite based on the waste of water-soluble ores / A. Adigamov, V. Zotov, R. Kovalev et al. // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. P. 17-23.
7. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill / J. Rybak, C. Kongar-Syuryun, Y. Tyulyaeva et al. // Mining Science. 2021. No. 28. P. 19-32.
8. Еременко В.А. Моделирование напряженно-деформационного состояния горнотехнической системы рудника при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки (в программном комплексе Map 3D) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 11. С. 5-17.

9. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка / Д.А. Кузиев, И.Ю. Пятава, И.Н. Клементьева и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 1. С. 128-133.
10. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послонной выемки прочных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 2. С. 123-128.
11. Мунинов Р.О., Райханова Г.Е., Кузиев Д.А. Повышение надежности и долговечности буровых станков за счет понижения динамических нагрузок // Уголь. 2021. № 5. С. 32-36. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-32-36.
12. Сесин И.Ю., Болбаков Р.Г. Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 6. С. 7-15. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6> (дата обращения: 15.04.2022).
13. Конюх В.Л. Имитация горных работ на персональном компьютере // Уголь. 2000. № 9. С. 33-35.
14. Потапов В.Д., Яризов А.Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности. М.: Высшая школа, 2008. 191 с.
15. Имитационное моделирование в горном деле. Апатиты: ИГД Кольского НЦ АН СССР, 2008.
16. Близнак Г.И., Чаплыгин Н.Н., Чуркин О.Е. Имитационное моделирование горного производства. Апатиты: Издательство КНЦ АН СССР, 2008.

*Original Paper*

UDC 622.272(043.3) © O.Yu. Kozlova, 2022

ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 5, pp. 42-45

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-42-45>**Title****EXPERIENCE IN APPLICATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF SIMULATION MODELING IN MINING****Author**Kozlova O.Yu.<sup>1</sup><sup>1</sup> MIREA - Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation**Authors Information**

**Kozlova O.Yu.**, PhD (Engineering), Assistant Professor, Department of Higher Mathematics and Programming, e-mail: [kozmaster@mail.ru](mailto:kozmaster@mail.ru)

**Abstract**

The use of simulation modeling of mining operations helps to minimize the risk of making wrong decisions in designing and development of mining enterprises.

**Keywords**

Programming languages, Mine design, Simulation modeling, Dispatching, Processor, Graphic fragment.

**References**

1. Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Khayrutdinov A.M. & Tyulyaeva Yu.S. Improvement of safety in mining water-soluble ores through optimization of filling mass parameters. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2021. (1), pp. 53-59 (In Russ.).
2. Adigamov A.E. & Yudenkov A.V. A model of the stress-and-strain state of a disturbed rock mass with account for anisotropy and inhomogeneities. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2021. (8), pp. 93-103 (In Russ.).
3. Herbut A., Khairutdinov M.M., Kongar-Syuryun C. & Rybak J. The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, (362), 012131.
4. Adigamov A., Rybak J., Golovin K. & Kopylov A. Mechanization of stowing mix transportation, increasing its efficiency and quality of the created mass. *Transportation Research Procedia*, 2021, (57), pp. 9-16.
5. Khairutdinov A., Ubysz A. & Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, (684), 012007.
6. Adigamov A., Zotov V., Kovalev R. & Kopylov A. Calculation of transportation of the stowing composite based on the waste of water-soluble ores. *Transportation Research Procedia*, 2021, (57), pp. 17-23.
7. Rybak J., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A.M. & Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. *Mining Science*. 2021, (28), pp. 19-32.

8. Yeremenko V.A. Modeling of the stress-and-strain state of a mine engineering system in uniaxial mining of three levels using the room-and-pillar mining system (in the Map3D software package). *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018. (11), pp. 5-17 (In Russ.).

9. Kuziev D.A., Pyatova I.Yu., Klementieva I.N. & Yeremenko V.A. Modeling of the stress-and-strain state of a mine engineering system in uniaxial mining of three levels using the room-and-pillar mining system (in the Map3D software package). *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018. (11), pp. 5-17 (In Russ.).

10. Klementieva I.N. & Kuziev D.A. Current state and development prospects of surface miner designs for blastless stratified excavation of hard rocks. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019. (2), pp. 123-128 (In Russ.).

11. Muminov R.O., Rayhanova G.E. & Kuziev D.A. Experimental research and analysis of a quarry drilling rig. *Ugol'*, 2021, (5), pp. 32-36. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-32-36.

12. Sesin I.Yu. & Bolbakov R.G. Comparative analysis of software optimization methods to control branching predication on graphics processors. *Rossijskij tehnologicheskij zhurnal*, 2021, Vol. 9, (6), pp. 7-15 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6> (accessed: 15.04.2022). (In Russ.).

13. Konyukh V.L. Simulation of mining operations on a personal computer. *Ugol'*, 2009, (9), pp. 33-35 (In Russ.).

14. Potapov V.D. & Yarizov A.D. Simulation modeling of production processes in the mining industry. *Moscow, Vysshaya Shkola Publ.*, 2008, 191 p. (In Russ.).

15. Simulation modeling in mining. *Apatity: Mining Institute of the Kola Research Center, Academy of Sciences of the USSR*, 2008. (In Russ.).

16. Bliznyuk G.I., Chaplygin N.N. & Churkin O.E. Simulation modeling of mining operations. *Apatity: Kola Research Center of the Academy of Sciences of the USSR Publ.*, 2008. (In Russ.).

**For citation**

Kozlova O.Yu. Experience in application and development prospects of simulation modeling in mining. *Ugol'*, 2022, (5), pp. 42-45. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-42-45.

**Paper info**

*Received February 1, 2022*

*Reviewed, February 16, 2022*

*Accepted April 21, 2022*